



EŽEKTORINIO AUŠINTUVO EFEKTYVUMO TYRIMAS

Vytautas ALIŠAUSKAS¹, Gintas VISELGA², Gintarė VISELGAITĖ³

Vilniaus Gedimino technikos universitetas, Vilnius, Lietuva

El. paštas: ¹vytautas.alisauskas@stud.vgtu.lt; ²gintas.viselga@vgtu.lt; ³gintare.viselgaite@stud.vgtu.lt

Santrauka. Pateikiama ežektorinių aušintuvų konstrukcijų ir veikimo principų apžvalga. Tiriama ežektorinio aušintuvo su skirtingais separatoriais darbo efektyvumo rodiklių priklausomybė nuo konfuzoriaus įėjimo angos kampo ir aušinamo vandens temperatūros.

Reikšminiai žodžiai: aušintuvas, ežekcija, konfuzorius, srautas, maišymas, dispergavimas, purškimas.

Ivadas

Apytiksliai apskaičiuota, kad Europos Sąjungoje oro šildymo gaminiai, vėsinimo gaminiai ir aukštatemperatūriai technologiniai aušintuvai 2010 m. suvartojo 2477 PJ energijos (59 Mt naftos ekvivalentu), o tai prilygsta 107 Mt į aplinką išmesto anglies dioksido. Jei nebus imtasi specialių priemonių, energijos, kurią per metus suvartoja oro šildymo gaminiai, vėsinimo gaminiai ir aukštatemperatūriai technologiniai aušintuvai, kiekis iki 2030 m. padidės iki 2534 PJ (60 Mt naftos ekvivalentu) (Juncker 2016).

Vandens aušintuvai naudojami siekiant sumažinti aušinamo skysčio temperatūrą dirbančiame įrenginyje ir užtikrinti sklandų jo darbą, mašinų gamybos, popieriaus, farmacijos, chemijos pramonėje (Eames *et al.* 1995). Temperatūrų perdavimas, vykstantis tarp oro ir vandens aušintuve, vadinamas šilumos mainais, o masės pernešimas nuo vieno komponento prie kito – masių mainais (Gourich *et al.* 2007). Praktikoje apytakiniam vandeniu aušinti taikomas aušinimo būdas išgarinant arba aušinimas ant apvalkalinių šilumokaičių. Abiem atvejais šaldymo agentas yra atmosferos oras. Išimtiniais atvejais gali būti naudojamas amoniakas ir kiti šaldymo agentai.

Uždarame aušintuve vanduo cirkuliuoja be tiesioginio ryšio su aušinama terpe. Šioje sistemoje vandens nuostoliai yra minimalūs (galimi nuostoliai tik dėl nutekančio vandens per nesandarias vietas).

Atviroje sistemoje vanduo imamas iš rezervuaro, perleidžiant pro šilumokaitį, ir vėl grąžinamas į vandens rezervuarą ar tam skirtas sistemas.

Šiuose aušintuvuose vanduo išpurškiamas įvairiais purkštukais lašų pavidalu, kurių paviršius ir tampa temperatūros

mainų paviršiumi. Oras sąveikauja su lašais dėl jo savaiminio judėjimo. Aušinant išeina daug skysčio, taip pat susidaro rūkas, todėl žiemą šalia esantys objektai gali apšalti.

Vandeniu aušinti pramonėje ir gamyboje yra įvairių būdų, bet naudingiausias ir perspektyviausias – aušinimas ežektoriniu apytakinio aušintuvu. Vandens aušintuvai taikomi, kai gamybos agregatai aušinami vandeniu. Juose aušinamas vanduo atiduoda šilumą į aplinką. Ežektorinio aušintuvo privalumas tas, kad jam nereikia nei aukšto traukos bokšto, nei ventiliatoriaus (Ulas 2006). Todėl nėra brangių statinių bei įrenginių ir yra mažos energijos sąnaudos. Pagal ES Komisijos reglamentą, kuriuo, įgyvendinant Europos Parlamento ir Tarybos direktyvą 2009/125/EB, nustatančią ekologinio projektavimo reikalavimų su energija susijusiems gaminiams nustatymo sistemą, aukštatemperatūrinių technologinių aušintuvų suvartojamos energijos kiekį galima sumažinti pritaikius esamas nepatentuotas technologijas, o bendros tokių gaminių išsigijimo ir naudojimo išlaidos nepadidėtų (Juncker 2016).

Ežektoriaus veikimo principas

Ežektorius – tai įrenginys, kuriame darbinio srauto kinetinė energija perduodama ežektuojamam srautui esant kontakto būsenai. Šie įrenginiai skirstomi pagal darbinio ir ežektuojamo srauto agregatinį būvį (Zamoum, Kessal 2015).

Pirmasis ežektorių išrado Charles Parsons 1901 m. Jis buvo naudojamas garo varikliams aušinti (Chunnanond, Aphornratana 2004).

Ežektoriniuose įrenginiuose pirmiausia potencinė ir šiluminė energijos virsta kinetine energija. Proceso metu, srautams patekus į maišymosi kamerą, greitis suvienodėja.

Susiliejus abiem srautams vėliau vyksta atbulinis kinetinės energijos virtimas potencine ir šilumine energija. Vienas iš pagrindinių ežektoriuje vykstančių procesų – maišymas (Ghassemi, Fasih 2011). Pagrindinis maišymo tikslas – didinti mišinį sudarančių komponentų fazių sąlyčio paviršius, todėl didėja tarpusavio reakcijų intensyvumas. Kuo didesnis skysčio sąlyčio su oru paviršius, tuo daugiau skystyje ištirpsta deguonies ir daugiau atiduodama šilumos. Ežektoriuje sumaišyto skysčio ir oro mišinys vadinamas dvifaziu srautu, nes tuo pat metu teka du skirtingų fazių fluidai (Igoa *et al.* 2011). Būtina sąlyga – dviejų skirtingų agregatinių būsenų (dujos, skystis, kietoji medžiaga) fluido ar medžiagų buvimas sraute (Clayton *et al.* 2009).

Skysčio, dujų ar garų fazių sąlyčio paviršius dažniausia didinamas disperguojant (lot. *dispergere* – išsklaidyti, išbarstyti). Dispergavimas ežektoriuje pasireiškia tada, kai darbinis skystis, ištekėdamas iš purkštuko, dėl slėgių skirtumo virsta įvairaus skersmens lašais. Tai vadinama hidrauliniu dispergavimu. Padidėjęs skysčio sąlyčio paviršius leidžia padidinti konfuzijos efektyvumą (Clayton *et al.* 2009).

Aušintuvo separatorius – tai įrenginys, padedantis atskirti vieną nuo kitos dvi terpes: orą ir vandenį. Tiriamų separatorių konstrukcijos daromos taip, kad separatorius sudarytų kuo mažesnius slėgio nuostolius. Pagrindinis separatorių efektyvumą apibūdinantis kriterijus yra pro jį tekančio srauto masių atskyrimas.

Tyrimų metodika

Ežektorinio aušintuvo tyrimų stendas

Ežektorinio aušintuvo eksperimentiniame tyrimų stende vandens siurblys 3 karštas vanduo tiekiamas į reguliuojamos padėties vandens purkštuką 1, kuriuo vandens srovė nukreipiama į konfuzoriaus įėjimo angą 4 su jos kampo reguliatoriumi (1 pav.). Separatoriumi 2 vanduo atskiriamas nuo oro ir nupylimo atvamzdžiu grąžinamas atgal į rezervuarą.

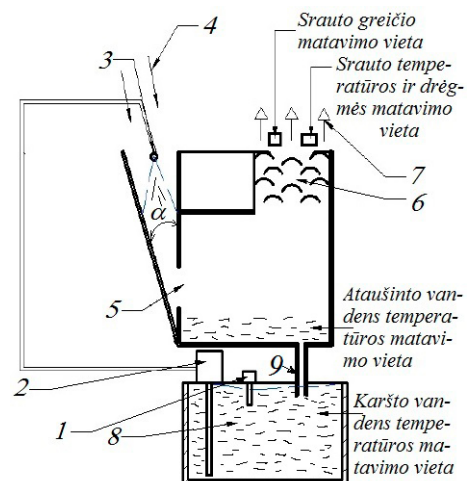
Ežektorinio aušintuvo eksperimentinio stendo principinė schema pateikta 2 paveiksle. Stende keičiami šie parametrai: separatorių 6 konstrukcija, konfuzoriaus įėjimo angos kampas α ir kaitintuvo 1 galia.

Eksperimento pradžioje įjungiamas kaitintuvas 1, norint pasiekti įrenginio 40 °C darbinę temperatūrą (2 pav.). Tuomet įjungiamas siurblys 2. Pro purkštuką 3 purškiamas jau sušildytas vanduo, kurio srautas savo judėjimo kryptimi įsiurbia aplinkos orą 4. Vanduo ir oras maišosi konfuzoriuje 5. Susimaišęs srautas toliau tiekiamas išėjimo angos link, kur įmontuotas separatorius 6. Jame vanduo atskiriamas nuo išeinančio oro. Ataušintas vanduo nutekamuju kanalu 9 grįžta į vandens rezervuarą 8.



1 pav. Ežektorinio aušintuvo eksperimentinis tyrimų stendas: 1 – reguliuojamos padėties vandens purkštukas; 2 – oro ir vandens separatorius; 3 – vandens siurblys; 4 – konfuzoriaus įėjimo angos kampo reguliatorius

Fig. 1. Experimental research stand of ejection cooler: 1 – water jet with adjustable position; 2 – separator of air and water; 3 – water pump; 4 – adjuster of confusor's angle of the inlet opening



2 pav. Ežektorinio aušintuvo tyrimų stendo principinė schema: α – konfuzoriaus įėjimo angos kampas; 1 – kaitintuvas; 2 – vandens siurblys; 3 – vandens purkštukas; 4 – įeinantis oro srautas; 5 – oro ir vandens maišymosi vieta; 6 – oro ir vandens separatorius; 7 – išeinantis oro srautas; 8 – vandens rezervuaras

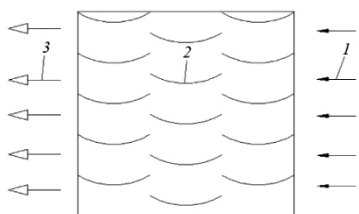
Fig. 2. Ejection cooler research stand's principal scheme: α – confusor's angle of the inlet opening; 1 – heater; 2 – water pump; 3 – water jet; 4 – inlet air stream; 5 – air and water mixing area; 6 – separator of air and water; 7 – outgoing air flow; 8 – water tank

Atliekant eksperimentą, vandens temperatūra matuojama kuo arčiau siurblio ir kuo arčiau nutekamojo kanalo (2 pav.). Taip siekiama užfiksuoti kuo tikslesnę tiekiamo ir grįžtančio vandens temperatūrą.

Tiriamų separatorių konstrukcijos

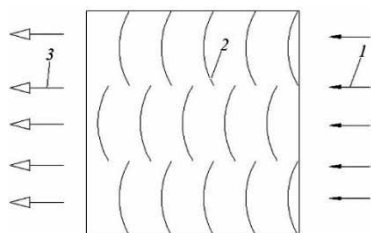
3 paveiksle pavaizduotas separatorius, kurio konstrukcija sudaryta iš pusapvalių mentelių. Tekantis srautas 1 nuo vienu lygiagrečiai su srauto kryptimi sumontuotų mentelių 2 nedideliu kampu nukreipiamas kitų link.

Išdėsčius išgaubtas menteles statmenai srauto kryptčiai (4 pav.), įeinantis srautas 1 atsimuša į mentelę 2 ir privalo ją apeiti priešinga kryptimi. Tokiu būdu sukuriamas didesnis slėgio nuostolius turintis separatorius.



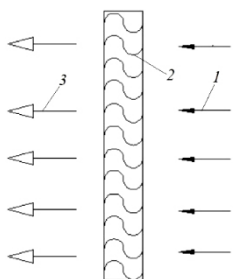
3 pav. Separatorius su lygiagrečiai su srautu išdėstytais mentelėmis: 1 – vandens, susimaišiusio su oru, srauto krypttis; 2 – mentelės; 3 – atskirto nuo vandens oro srauto krypttis

Fig. 3. Separator with parallel flow set out spatulas:
1 – mixed with the air water's flow direction; 2 – spatulas;
3 – separated from the water air flow direction



4 pav. Separatorius su statmenai srautui išdėstytais mentelėmis: 1 – vandens, susimaišiusio su oru, srauto krypttis; 2 – mentelės; 3 – nuo vandens atskirto oro srauto krypttis

Fig. 4. Separator with vertical flow set out spatulas:
1 – mixed with the air water's flow direction; 2 – spatulas;
3 – separated from the water air flow direction



5 pav. Separatorius su įstrižai srauto išdėstytais S formos mentelėmis: 1 – vandens, susimaišiusio su oru, srauto krypttis; 2 – mentelės; 3 – atskirto nuo vandens oro srauto krypttis

Fig. 5. Separator with S-shaped spatulas, set out diagonally to the flow: 1 – mixed with the air water's flow direction; 2 – spatulas; 3 – separated from the water air flow direction

Trečiojo separatoriaus konstrukcija (5 pav.) įeinantį srautą 1 užsuka didesniu kampu nei pirmasis. Tačiau jo pasipriešinimas mažesnis nei 4 paveiksle pavaizduoto

separatoriaus. Tai tarpinis anksčiau aptartų separatorių variantas.

3–5 paveiksluose pavaizduotų trijų tipų separatorių efektyvumas nustatomas lyginant oro drėgmę ir srauto greitį už jų.

Tyrimų atlikimo eiga

Eksperimentas atliekamas esant 22 °C oro temperatūrai ir 67 % RH drėgmei, gerai vėdinamoje patalpoje.

Tyrimai atlikti su trimis separatoriais, kai keturi komfuzoriaus kampai α yra 40, 30, 25 ir 20 laipsnių. Įjungus kaitintuvą, vanduo įkaitinamas iki darbinės temperatūros. Po 30 minučių nusistovi darbinis režimas, o tada įjungiamas siurblys.

Eksperimento metu matuojama tiekiamo ir gaunamo vandens temperatūra, išeinančio oro srauto greitis, drėgmė ir temperatūra. Kas 60 sekundžių su visais separatoriais atliekama po 20 matavimų. Pakeitus separatorių įrenginio darbo režimas pasiekiamas po 5 minučių. Paskui analogiški tyrimai atliekami prie kitų komfuzoriaus kampų. Tuo siekiama surasti efektyviausią oro ir vandens maišymosi sąlyčio plotą. Pakeitus kampą, režimas nusistovi ir pradeda matuoti po 10 minučių. Gauti visų trijų separatorių esant keturiems komfuzoriaus kampams eksperimentiniai duomenys apdorojami kompiuterine „Excel“ programa.

Multimetru „MASTECH MAS 838“ buvo matuojama įtekančio ir ištekančio vandens temperatūra (°C). Prietaiso padalos vertė – 1 °C. Šiuo įrenginiu matuojama kontaktiniu būdu, termopora panardinant į vandenį apie 50 mm gylyje.

Temperatūros ir drėgmės duomenų kaupiklius „FHT 70 DataLog RZ“ buvo matuojama išeinančio oro srauto drėgmė (% RH) (padalos vertė 0,1) ir išeinančio srauto temperatūra (°C) (padalos vertė 0,1).

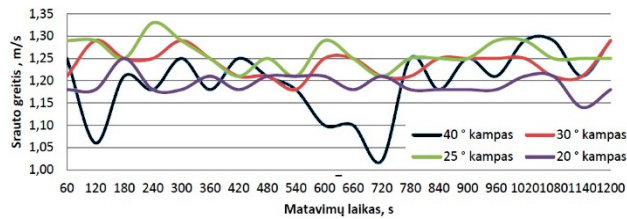
Termometru – manometru „FTA 1“, kurio skalės padalos vertė – 0,01, buvo matuojamas išeinančio oro srauto greitis (m/s). Matuota oro srauto išėjimo angoje iš karto už separatoriaus. Pagal LAND rekomendacijas buvo abi išeinančio srauto kraštinės, padalytos į 4 dalis ir pasirinkta 16 matavimo taškų. Matavimų duomenys fiksuojami išvedus visų 16 taškų vidurkį.

Nustačius optimalius įrenginio parametrus ir norint nustatyti didžiausią naudingumo koeficientą, siekiant įvertinti įrenginio pritaikymo sritį, keičiama kaitintuvo galia.

Tyrimų rezultatai

Pirmojo eksperimento metu nustatomas tinkamiausias komfuzoriaus kampas pagal oro srautui sukeliama mažiausią pasipriešinimą.

6 paveiksle pateikta ežektuojamo oro greičio diagrama, kai aušintuvas dirba su lygiagrečiai su srautu išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis. Joje matomas nedidelis pranašumas esant 25° ir 30° konfuzoriaus kampams. Padidinus konfuzoriaus kampą iki 40°, gaunama labai nestabili oro srauto greičio charakteristika.



6 pav. Oro srauto greičio priklausomybė nuo konfuzoriaus kampo, su lygiagrečiai su srautu išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis

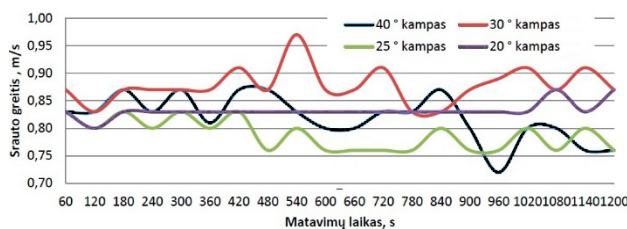
Fig. 6. The air flow speed's dependence from confuser's angle, with parallel to the flow set out curved separator spatulas

Įrenginio su statmenai srautui išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis mažiausias pasipriešinimas nustatytas esant 30° konfuzoriaus kampui. Tačiau pro šį separatorių pratekėjusio srauto vidutinis greitis yra apie 0,4 m/s mažesnis nei lygiagrečių su srautu mentelių separatoriuje (7 pav.).

Įmontavus trečiąjį separatorių, pastebimas konfuzoriaus su 30° kampu pranašumas, o didžiausią pasipriešinimą sukelia 25° kampas (8 pav.).

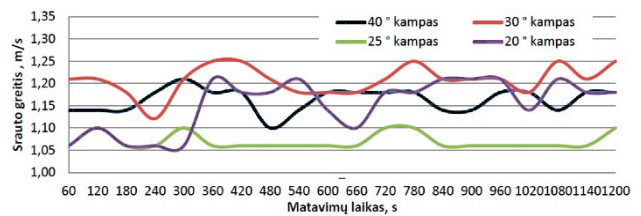
Galima teigti, kad pats universaliausias ir tinkamiausias visų tipų separatoriams yra 30° konfuzoriaus kampas. Didžiausias oro srauto greitis yra aušintuve su lygiagrečiai su srautu išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis, o mažiausias – kai šios mentelės išdėstytos statmenai oro srautui.

Pagrindinis separatoriaus efektyvumo rodiklis yra kuo mažesnis vandens pralaidumas. Tad eksperimentinių tyrimų metu nustatomi ir palyginami kiekvieno jų drėgmės pralaidumo rodikliai. Kaip matome iš 9 paveikslo, 40° kampas yra efektyviausias taupant vandenį, kai aušintuvas dirba su lygiagrečiai su srautu išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis.



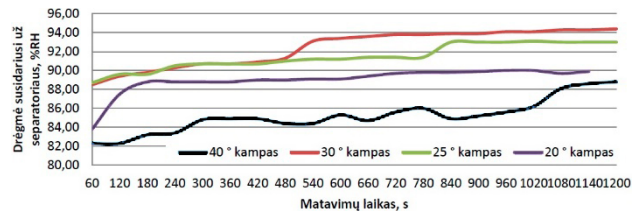
7 pav. Oro srauto greičio priklausomybė nuo konfuzoriaus kampo, su statmenai srautui išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis

Fig. 7. The air flow speed's dependence from confuser's angle with vertically to the flow set out curved separator spatulas



8 pav. Oro srauto greičio priklausomybė nuo konfuzoriaus kampo, su įstrižai srauto išdėstytais S formos separatoriaus mentelėmis

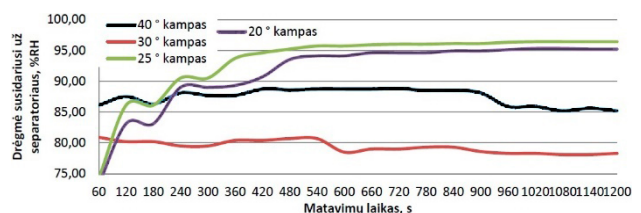
Fig. 8. The air flow speed's dependence from confuser's angle, with diagonally to the flow set out s-shaped separator spatulas



9 pav. Oro srauto drėgmės priklausomybė nuo konfuzoriaus kampo, su lygiagrečiai su srautu išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis

Fig. 9. The air flow humidity's dependence from confuser's angle with parallel to the flow set out curved separator spatulas

Įrenginio su statmenai srautui išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis konstrukcija geriausiai sulaiko išeinančio srauto drėgmę esant 30° konfuzoriaus kampui (10 pav.).



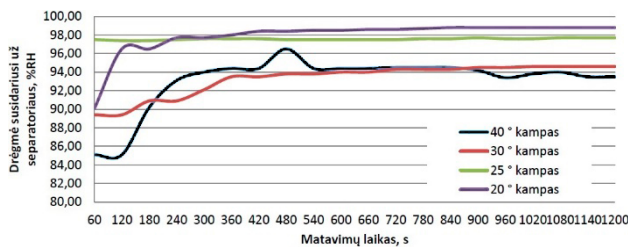
10 pav. Oro srauto drėgmės priklausomybė nuo konfuzoriaus kampo, su statmenai srautui išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis

Fig. 10. The air flow humidity's dependence from confuser's angle with vertically to the flow set out curved separator spatulas

11 paveiksle matomas aušintuvo su įstrižai srauto išdėstytais S formos separatoriaus mentelėmis konfuzoriaus 30–40° kampo pranašumas, iš oro srauto atskiriant vandenį.

Iš tyrimų paaiškėjo, kad geriausia konstrukcija yra aušintuvo su statmenai srautui išdėstytais išgaubtomis separatoriaus mentelėmis, esant 30° konfuzoriaus kampui, nes yra geriausiai (apie 20 % RH) sulaikoma išeinančio srauto drėgmė. Pagal tai ši konstrukcija pasirenkama tolimesniems aušinamo technologinio įrenginio galios nustatymo eksperimentiniams tyrimams.

Esant aušinamo įrenginio 1,1 kW galiai, aušintuvo naudingumo koeficientas siekia 8,1 %. Sumažinus



11 pav. Oro srauto drėgmės priklausomybė nuo konfuzoriaus kampo, su įstrižai srauto išdėstytais S formos separatoriaus mentelėmis

Fig. 11. The air flow humidity's dependence from confuser's angle with diagonally to the flow set out s-shaped separator spatulas

aušintuvo galią iki 0,6 kW, sumažėja temperatūra, o kartu iki 6,6 % sumažėja ir aušintuvo naudingumas. Pakartojus eksperimentą su 1,7 kW galios vandens šildytuvu, gaunamas 7,9 % naudingumo koeficientas. Nedidelis pokytis tarp 1,1 ir 1,7 kW kaitintuvų leidžia daryti išvadą, kad tiriamas aušintuvas geriausiai veikia aušindamas tokią galią turinčius įrenginius.

Išvados

1. Nustatyta tinkamiausia aušintuvo separatoriaus konstrukcija – su statmenai srautui išdėstytais išgaubtomis mentelėmis, nes jos drėgmės sulaikymas yra pats didžiausias – apie 20 % RH.
2. Nustatytas konfuzoriaus kampas, su kuriuo aušintuvas efektyviausiai aušina vandenį. Jo įeinančio oro ir purškiamo vandens maišymosi kameros optimalus sienelių kampas yra 30°. Esant šiam konfuzoriaus kampui, aušintuvo visų tirtų separatorių pasipriešinimas oro srauto tėkmei yra mažiausias, nes greitis už jo pats didžiausias.
3. Tiriamas aušintuvas geriausiai tiktų aušinti 1,1–1,7 kW galios įrenginius.

Literatūra

- Chunnanond, K.; Aphornratana, S. 2004. Ejectors: applications in refrigeration technology, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 8(2): 129–155.
- Clayton, T., et al. 2009. *Engineering fluid mechanics*. 9th ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc. 600 p.
- Eames, I. W.; Aphornratana, S.; Sun, D.-W. 1995. The jet-pump cycle—a low cost refrigerator option powered by waste heat, *Heat Recovery Systems & CHP* 15(8): 711–721. [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(95\)00006-K](https://doi.org/10.1016/0890-4332(95)00006-K)

Ghassemi, H.; Fasih, H. F. 2011. Application of small size cavitating venturi as flow controller and flow meter, *Flow Measurement and Instrumentation* 22(5): 406–412. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2011.05.001>

Gourich, B.; El Azher, N.; Vial, C.; Belhaj Soulami, M.; Ziyad, M.; Zoulalian, A. 2007. Influence of operating conditions and design parameters on hydrodynamics and mass transfer in an emulsion loop–venturi reactor, *Chemical Engineering and Processing* 46(2): 139–149. <https://doi.org/10.1016/j.ccep.2006.05.006>

Igoa, S. W.; Bathiebo, J.; Palm, K.; Chesneau, X. 2011. Laminar forced convection heat and mass transfer in a venturi tube with wetted walls, *Frontiers in Heat and Mass Transfer* 2(3): 7. <https://doi.org/10.5098/hmt.v2.3.3007>

Juncker, J.-C. 2016. *Komisijos reglamentas (ES), kuriuo, įgyvendinant Europos Parlamento ir Tarybos direktyvą 2009/125/EB, nustatančią ekologinio projektavimo reikalavimų su energija susijusiems gaminiams nustatymo sistemą, nustatomi oro šildymo gaminių, vėsinimo gaminių ir aukštemperatūrių technologinių aušintuvų ir ventiliatorinių konvektorių ekologinio projektavimo reikalavimai* [interaktyvus], [žiūrėta 2016 m. lapkričio 20 d.]. Prieiga per internetą: <http://webcache.googleusercontent.com/search?q=cache:THzKvqXybKkJ:ec.europa.eu/transparency/regcomitology/index.cfm%3Fdo%3DSearch.getPDF%26ouhgU7LmWUnxtyQyWsSCnHJmkyJIKIUaCjof5d1Jh/y5SVAw47eF02NzJLXFBE77kGvLzo2Pu5uyjPyPE0HGhn1Yyu8a5h-ceFqN5ixnqYI%3D+&cd=9&hl=en&ct=clnk&gl=lt>

Ulas, A. 2006. Passive flow control in liquid-propellant rocket engines with cavitating venturi, *Flow Measurement and Instrumentation* 17(2): 93–97. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2005.10.003>

Zamoum, M.; Kessal, M. 2015. Analysis of cavitating flow through a venturi, *Scientific Research and Essays* 10(11): 1–10.

EFFICIENCY ANALYSIS OF EJECTOR COOLER

V. Ališauskas, G. Viselga, G. Viselgaitė

Abstract

In this article the review of ejection coolers' constructions and operation principles is presented. The ejection cooler's work efficiency reates' dependence from confusor inlet opening's angle and the cooled water's temperature is examined.

Keywords: cooler, ejection, confusor, flow, confusion, dispersing, spraying.